

УДК 681.7.08:621.382.13

Пространственно-временные модуляторы света на основе структур металл—диэлектрик—полупроводник—жидкий кристалл

А. В. Борошнев, Н. Ф. Ковтонюк

Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦНИИ «Комета», Москва, Россия

Рассмотрены итоги разработки технологии изготовления пространственно-временных модуляторов света на структурах металл—диэлектрик—полупроводник—жидкий кристалл (МДП—ЖК) из монокристаллического арсенида галлия и нематических жидких кристаллов. Приведены сведения по отработке основных технологических операций в целях удовлетворения требований телевизионных стандартов, а также сведения по созданию на основе пространственных модуляторов средств оптической обработки и отображения информации.

Пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) предназначены для преобразования изображений по спектру, когерентности и мощности. Они разрабатывались прежде всего для построения когерентно-оптических Фурье-спектроанализаторов изображений [1]. Наиболее высокие характеристики ПВМС по всей совокупности требований, особенно по быстродействию, были получены на структурах металл—диэлектрик—полупроводник—жидкий кристалл (МДП—ЖК) из полупроводникового арсенида галлия с монополярной диффузией [2]. В таких приборах достигнута разрешающая способность ~100 лин/мм без разделения полупроводника на отдельные элементы методами фотолитографии.

В состав ПВМС (рис. 1) входят полупроводниковая пластина (толщина 100 мкм, диаметр 3—5 см) и жидкокристаллическая ячейка с ориентирующими покрытиями (толщина ЖК — 10 мкм). ЖК-ячейки отделяются от полупроводника диэлектрическим зеркалом и поглощающим черным слоем. Все эти слои помещены между прозрачным стеклом и волоконно-оптической пластиной (ВОП) толщиной 1 см с прозрачными проводящими электродами. ВОП на входе ПВМС требуется для его стыковки с малогабаритными электронно-лучевыми трубками и электронно-оптическими преобразователями (ЭОП), которые на выходе снабжены также ВОП. При этом достигаются минимальные потери энергии излучения люминофора.

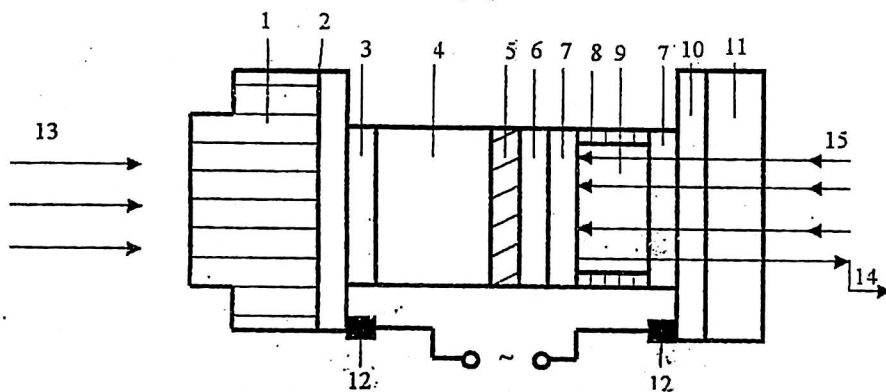


Рис. 1. Конструкция ПВМС на основе структуры МДП—ЖК:

- 1 — волоконно-оптическая пластина; 2 — прозрачный электрод; 3 — оптический клей;
- 4 — полупроводниковая пластина; 5 — поглощающий слой; 6 — диэлектрическое зеркало;
- 7 — ориентирующий слой; 8 — диэлектрические прокладки; 9 — жидкий кристалл;
- 10 — прозрачный электрод; 11 — стеклянная подложка; 12 — омический контакт;
- 13 — входное изображение; 14 — выходное изображение; 15 — луч опроса

К ПВМС предъявляются высокие требования телевизионных стандартов, что требует использования технологии обработки поверхности слоев с точностью $\lambda/10$ по всей апертуре (30—50 мм), где λ — длина волны считывающего света (рис. 2).

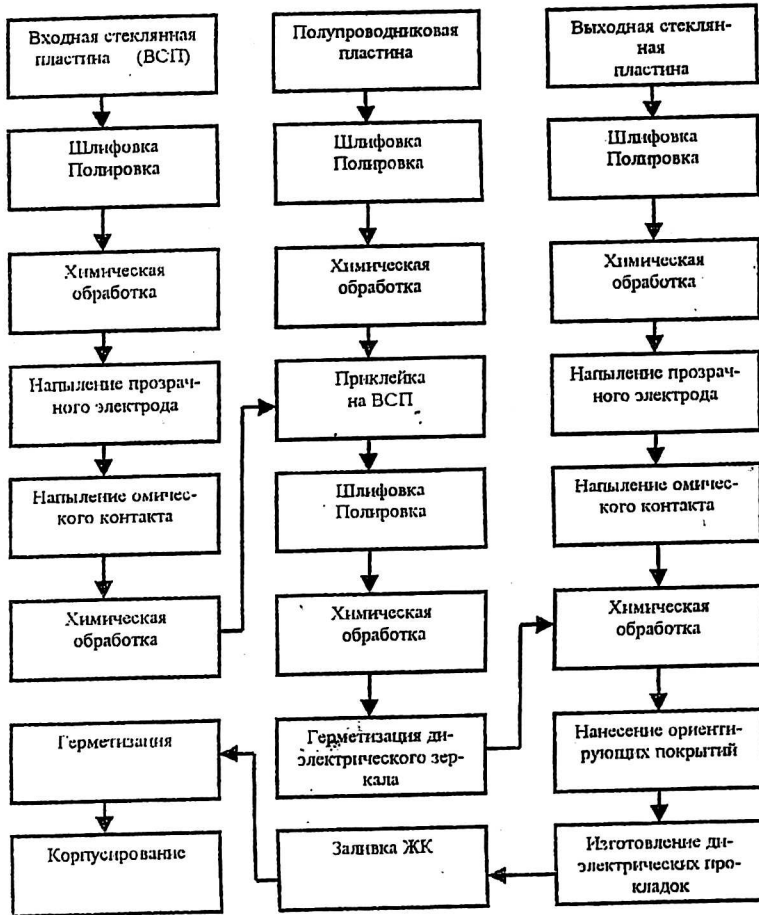


Рис. 2. Схема технологического процесса изготовления ПВМС

Принцип действия ПВМС

Емкостные сопротивления слоев (соответственно их толщины) выбираются такими, чтобы приложенное к прозрачным электродам переменное напряжение ($f = 10^4$ Гц, $U = 10-30$ В) в отсутствие подсветки изображением в основном падало на слой фотополупроводника, а напряжение на слое ЖК было меньше порогового напряжения переориентации его молекул [1]. Записывающий свет входного изображения создает в полупроводнике рельеф свободных носителей зарядов, которые приводят к образованию рельефа емкости структуры, соответствующего входному изображению. В освещенных участках емкость слоя полупроводника возрастает, что приводит к возрастанию напряжения на слое ЖК. Максимальный коэффициент увеличения емкости определяется соотношением толщины полупроводника к суммарной толщине диэлектрических слоев структуры.

При напряжении на ЖК больше порогового значения для переориентации молекул показатель преломления ЖК изменяется и формируется его рельеф.

Прошедший через слой ЖК световой поток опроса модулируется в соответствии с изменением показателя его преломления. При наличии в схеме опроса поляроидов воспроизводится амплитудная картина преобразованного изображения.

Конструктивно МДП-структура формируется на входной стеклянной подложке со стороны нанесенного на нее прозрачного электрода. Светомодулирующая часть представляет собой ЖК-ячейку (ЖКЯ), опорными стенками которой являются поверхности пластины полупроводника и выходной стеклянной подложки со стороны второго прозрачного электрода (см. рис. 1).

Основные технологические операции при использовании монокристаллической полупроводниковой пластины сводятся к следующему [2].

Формирование МДП-структуры

Неразборная конструкция структуры предусматривает приклейку полупроводниковой пластины к полированной стеклянной подложке с очищенной стороной, а обработка второй пластины осуществляется в составе склейки. Такой способ обработки позволяет получить слой полупроводника толщиной до 20 мкм без ущерба его механической прочности. На полированную сторону полупроводника вакуумным способом последовательно наносятся диэлектрический слой двуокиси кремния и слой прозрачного электрода из окиси индия. Такую структуру приклеивают оптическим клеем ОК-77Ф к стеклянной подложке со слоем окиси индия. Электрический контакт между прозрачными электродами осуществляется с помощью капли токопроводящего клея ТПК-1, нанесенной по периферии полупроводниковой пластины. Для склеивания пластин наиболее подходит по своим температурным характеристикам клей ОК-77Ф (минимальная усадка 3,6 %, интервал рабочих температур — 130—170 °С). Этот клей не вызывает заметной деформации после нагрева до 80 °С, что обуславливает потребность достаточно низкотемпературной технологии последующих операций.

Диэлектрические зеркала в ПВМС требуются для предотвращения засветки полупроводника считывающим светом. Они представляют собой интерференционный отражающий фильтр на заданную длину волны считывания и состоят из чередующихся слоев толщиной $\lambda/4$ с разными показателями преломления [3]. В качестве материала для диэлектрических зеркал в области 0,43—0,9 мкм выбраны двуокись кремния ($n = 1,45$) и двуокись титана ($n = 2,46$), которые позволяют создавать зеркала с коэффициентом отражения 99,6 % с относительной полушириной $\Delta\lambda/\lambda = 0,26$.

Для выполнения требований низкотемпературной технологии зеркала наносили методом термического испарения в вакууме при нагреве подложки до 80 °С. Первым на полупроводник наносится слой двуокиси кремния, затем слой двуокиси титана, а затем последовательно 14 слоев.

Улучшение границы раздела арсенид галлия — диэлектрическое зеркало достигается нанесением на полупроводник промежуточного слоя теллурида кадмия толщиной 1,5 мкм, являющегося одновременно светоблокирующим слоем для оптической изоляции полупроводника от прошедшего через зеркало считывающего света.

Эксперименты показали, что слой теллурида кадмия защищает полупроводник от нежелательного влияния встроенного в диэлектрическом зеркале заряда.

Изготовление ЖКЯ

Качество преобразованного изображения во многом зависит от технологических факторов: толщины ЖК-слоя, плоскопараллельности, плоскостности, упорядоченности молекул ЖК, наличия газовых включений и др.

Технология сборки ЖКЯ предусматривает выбор инертных материалов, создание опорных поверхностей с однородной ориентацией молекул ЖК, получение плоскопараллельного зазора заданной толщины, заливку ЖК и герметизацию ЖКЯ по периметру [4].

Для создания ориентирующих слоев сначала на подложку наносится раствор органического материала (поливиниловый спирт — ПВС), который методом центрифугирования равномерно распределяется по поверхности и после термической обработки превращается в устойчивую полимерную пленку. Затем эта пленка подвергается натирке вращающейся капроновой щеткой [2].

В результате натирки на полимерной пленке образуется микрорельеф в виде бороздок, который обеспечивает надежную ориентацию молекул ЖК. Требуемая толщина зазора ЖКЯ получается с помощью калиброванных прокладок из фторопласта толщиной 10 мкм. Способность фторопласта к деформации позволяет регулировать плоскопараллельность зазора и одновременно визуально контролировать ее интерференционным методом.

Для герметизации ЖКЯ, до заливки ЖК, по периметру ячейки наносится клей-герметик, оставляя нетронутым заливочное отверстие. Для заливки ЖК используется вакуумный способ. На подготовительном этапе размещают ванну с ЖК и ячейку заливочным отверстием вниз в вакуумной камере. После достижения определенного вакуума жидкий кристалл подводится к заливочному отверстию, а затем в камеру вводится атмосферный воздух для "запрессовывания" ЖК в ячейку.

Используемые в ПВМС подложки подвергаются тщательной полировке и отмывке. При этом предъявляются жесткие требования: плоскопараллельность или отклонение от равномерности по толщине не хуже чем 0,2 мкм, отклонение поверхности от плоскости или неплоскостность не хуже (0,1—0,5) N и 0,05 N, глубина рельефа поверхности не более 0,025—0,05 мкм, что соответствует 14-му классу шероховатости; чистота обрабатываемой поверхности должна соответствовать классу P11. В полупроводниковых пластинах должна быть минимальная глубина нарушенного слоя ($\leq 0,5$ мкм).

Используя традиционные методы шлифовки, отмывки и химико-динамической полировки, удается удовлетворить вышеприведенным требованиям.

Серьезным препятствием на пути получения высококачественных ПВМС с большой апертурой (≈ 5 см) является несовершенство монокристаллов арсенида галлия: дислокации, примесные неоднородности, собственные точечные дефекты структуры и их скопления. Кристаллы диаметром менее 3 см более однородны и на их основе удается создать высококачественные приборы.

В целом в технологии изготовления ПВМС используется 47 технологических операций, 28 единиц оборудования, 56 материалов, 42 единицы технологической оснастки. Трудоемкость изготовления одного прибора составляет ~ 400 н.-ч. Процент выхода годных приборов 10,6 %. Основную долю трудоемкости составляют операции шлифовки и полировки, так как при штучном производстве затрачивается много ручного труда и требуется индивидуальный подход.

ПВМС, изготовленные по данной технологии, имеют следующие параметры:

фоточувствительность ($= 0,6$ мкм), Вт/см ²	10 ⁻⁶
разрешающая способность, лин/мм	30
быстродействие, с	10 ⁻²
контраст преобразованного изображения	60
дифракционная эффективность, %	10
напряжение питания, В	30
частота, Гц	10 ⁴
апертура, мм	30

Имеется возможность повышения характеристик ПВМС с использованием других материалов. Например, применение сегнетоэлектрических ЖК увеличивает быстродействие в 10—100 раз, однако это приводит к возрастанию энергопотребления и требует организации теплоотвода. С применением аморфных напыленных полупроводников увеличивается разрешающая способность до сотен лин/мм, однако это влечет уменьшение быстродействия из-за увеличения емкости структуры. Всей совокупности требований, соответствующих телевизионному стандарту, отвечают приборы на основе монокристаллического арсенида галлия и нематических жидких кристаллов с гибридным эффектом.

На их основе созданы эффективные Фурье-спектроанализаторы пространственных спектров, в том числе в бортовом исполнении для анализа спектров в подстилающей поверхности в реальном масштабе времени. Одним из основных узлов этой аппаратуры является преобразователь изображений, представляющий собой оптически соединенные электронно-оптический преобразователь (ЭОП) и ПВМС. Усиленное с помощью ЭОП по яркости изображение с помощью ПВМС переносится на когерентную несущую, затем выходным объективом его Фурье-спектр, который воспринимается фотоматрицей ПЗС, вводится в ЭВМ и анализируется по определенным признакам, позволяющим провести идентификацию. Такой оптический процессор дает возможность обрабатывать в реальном времени изображения с информационной емкостью 1000×1000 элементов разрешения.

На основе ПВМС разработаны корреляторы для распознавания изображений методами согласованной пространственной фильтрации. В них пространственный спектр входных изображений сравнивается со спектром эталонных изображений, и по наличию и по положению корреляционного пика вырабатывается информация о координатах объекта во входном изображении. Текущие и эталонные изображения преобразуются с помощью ПВМС на когерентную несущую, затем проходят Фурье-объектив и взаимодействуют в пространственно-частотной плоскости на специализированном ПВМС типа МДП—ЖК, который выполняет роль реверсивной регистрирующей среды для записи и считывания голограмм на частоте 200 лин/мм.

В таком ПВМС диэлектрическое зеркало и поглощающий слой отсутствуют, а входные изображения поступают через слой жидкого кристалла. Выходной сигнал формируется при частичном отражении света от полированной поверхности полупроводника, граничащей с ЖК.

Созданные корреляторы нашли применение в разработке астродатчиков с секундной точностью, а также бортовых устройств ориентации по карте местности.

Кроме того, на основе ПВМС реализованы операции вычитания изображений [5], псевдоцветного кодирования, усиления телевизионных изображений и проектирования их на экран коллективного пользования [6], получения объемных телевизионных изображений и записи голограмм удаленных объектов [7], построения безопасных малогабаритных дисплеев [8], эффективного управления мощным лазерным потоком для лечения онкологических заболеваний, подавления в изображениях ярких слепящих участков без уменьшения яркости наблюдаемых объектов в ближних областях.

Заключение

Существенный интерес к аналоговым приборам с распределенными параметрами типа ПВМС, позволяющим в реальном времени осуществлять интегральные преобразования изображений, имел место примерно 15—20 лет

назад, когда цифровая электроника еще находилась в стадии развития. С появлением быстрого преобразования Фурье цифровыми методами и жидкокристаллических высокоинформативных матриц с активной адресацией интерес к системам ПВМС стал ослабевать. В последние годы появились нейрокompьютерные алгоритмы обработки больших массивов информации, реализация которых цифровыми методами сталкивается с определенными трудностями, и возник новый виток интереса к специализированным устройствам обработки на основе аналоговых структур с распределенными параметрами типа ПВМС.

Л и т е р а т у р а

1. Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф., Савин А. И. Преобразование изображений в структурах полупроводник — диэлектрик. — М.: Наука, 1987. — 176 с.
2. Ковтонюк Н. Ф., Сальников Е. Н. Фоточувствительные МДП—ЖК структуры для преобразования изображений. — М.: Радио и связь, 1990. — 158 с.
3. Справочник технолога-оптика/Под ред. С. М. Кузнецова. — Л.: Машиностроение, 1983. — 414 с.
4. Физические свойства жидкокристаллических веществ. — М.: Мир, 1982. — 196 с.
5. Беляев В. В., Ковтонюк Н. Ф., Курейченко В. С., Одинокоев С. Б., Савин А. И., Чигринов В. Г. Вычитание изображений в реальном масштабе времени с помощью жидкокристаллического ПВМС//ДАН СССР. 1989. Т. 306. № 6. С. 1372—1374.
6. Думаревский Ю. Д., Земсков К. И., Казарян М. А., Ковтонюк Н. Ф., Петраш Г. Г., Савин А. И. Проецирование изображений на большой экран с помощью структур МДП—ЖК и квантовых усилителей//Там же. 1987. Т. 292. № 3. С. 604—607.
7. Ковтонюк Н. Ф., Костюк А. В. Получение объемных изображений и голографирование некомпактных объектов//Там же. Т. 306. № 3. С. 609—612.
8. Ковтонюк Н. Ф., Борошнев А. В., Клюкин А. Л., Соколов А. В. Жидкокристаллический дисплей с ПВМС//Оптический жур. 1993. № 7. С. 74—77.

Spatial-light modulators on the base of metal—dielectric—semiconductor—liquid crystal structures

A. V. Boroshnev, N. F. Kovtonyuk

State Unitary Enterprise «Central R&D Institute "Cometa"», Moscow, Russia

The results of the development of technology production of spatial light modulators (SLM) on the base of metal—dielectric—semiconductor—liquid crystal structures (MDS—LC) with single crystal GaAs and nematic liquid crystals are considered. The information about the principal technology operations that make SLM suitable to television standards is presented.